

# Analisis Probabilitas Aliran Daya Optimum Menggunakan *First Order Second Moment Method* (FOSMM) pada Sistem Transmisi Listrik

Moh Malik Afandi, Rony Seto Wibowo dan Adi Soeprijanto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111, Indonesia.

Email: afandi.malik1206@gmail.com, ronyseto@ee.its.ac.id, adisup@ee.its.ac.id

**Abstrak** - *Optimal Power Flow* (OPF) merupakan media yang efisien dan paling sering digunakan dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. Namun, model OPF memiliki beberapa kekurangan seperti ketidakakuratan pada gangguan acak atau faktor-faktor tak tentu seperti variasi dari beban nodal dan perubahan konfigurasi jaringan. Hal tersebut mengakibatkan kesalahan perhitungan pada sistem *load forecasting*. Untuk mengatasi masalah tersebut, dipertimbangkan model baru dari OPF menggunakan pendekatan teori probabilitas melalui *Probabilistic-Optimal Power Flow* (P-OPF). P-OPF merupakan model pengoperasian sistem tenaga menggunakan pendekatan secara statistik seperti standar deviasi, *mean*, fungsi kepadatan probabilitas (PDF) dan fungsi distribusi kumulatif (CDF). P-OPF mempunyai tingkat akurasi lebih tinggi daripada model OPF. Namun beberapa metode masih membutuhkan kemampuan komputer yang sangat tinggi seperti metode *Monte Carlo Simulation* (MCS). Metode *First Order Second Moment Method* (FOSMM) pada P-OPF tidak membutuhkan kemampuan komputer sebesar metode *Monte Carlo Simulation* dan kemampuan iterasi yang mendekati metode OPF konvensional. Hasil dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk menemukan nilai rata-rata dan simpangan baku dari semua parameter *optimal power flow*.

**Kata Kunci** : POPF, Kapasitas Saluran, *First Order Second Moment Method*

## I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan energi primer yang membutuhkan suatu operasi sistem untuk pembangkitan dan penyalurannya. Tujuan utama pengoperasian sistem adalah mempertahankan keadaan normal selama mungkin. Kriteria umum yang digunakan dalam menilai kinerja operasi sistem tenaga listrik adalah kriteria SEQ (*Security, Economy dan Quality*) [1]. *Security* atau sekuritas adalah kemampuan Sistem untuk menghadapi kejadian yang tidak direncanakan, tanpa mengakibatkan pemadaman. *Economy* atau ekonomi yaitu optimasi biaya pengoperasian sistem agar minimum tanpa melanggar batasan mutu dan keamanan. *Quality* yaitu kemampuan sistem untuk menjaga agar semua batasan operasi terpenuhi. Operasi sistem tenaga pada sistem kelistrikan diharapkan dapat menghasilkan sistem yang handal dan optimal secara ekonomi untuk mengatasi kondisi beban yang fluktuatif dalam 24 jam dengan memenuhi batasan operasi.

*Optimal Power Flow* (OPF) telah sering digunakan sebagai media yang efisien dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik. Model dari OPF telah mengalami perubahan dan perkembangan seiring dengan semakin banyaknya variasi sistem tenaga yang akan dioptimalkan. Selain itu, OPF juga merupakan salah satu

media yang paling sering digunakan untuk *forecasting* dalam sistem tenaga listrik. Namun, banyak gangguan acak atau faktor-faktor tak tentu, seperti variasi dari beban nodal, perubahan dalam konfigurasi jaringan dan kesalahan *forecasting* atau penghitungan dari parameter dan variable input pada operasi sistem tenaga. Hal tersebut sangat mempengaruhi hasil dari OPF, paling tidak akan membuat beberapa ekstensi, ketidakakuratan [2,3].

Untuk mengatasi faktor-faktor tak tentu pada sistem tenaga, diputuskan untuk menggunakan OPF dengan konteks teori probabilitas atau yang sering disebut sebagai *Probabilistic-Optimal Power Flow* (POPF). POPF mengatasi masalah faktor-faktor tak tentu dari sistem tenaga sebagai variabel acak dengan distribusi probabilitas dan diperoleh informasi statistik optimal, seperti rata-rata, penyimpangan baku, fungsi kepadatan probabilitas (PDF) dan fungsi distribusi kumulatif (CDF) [3].

Optimalisasi aliran daya menggunakan metode *probabilistic* telah berkembang dan menjadi salah satu metode utama dengan mengambil faktor-faktor tak tentu dari beberapa parameter di sistem tenaga. Contohnya adalah, hal yang diakibatkan dari perubahan biaya listrik. Hal tersebut dimodelkan secara *probabilistic* pada sistem POPF [4,5,6,7]. Beban sistem tersebut tidak bergantung terhadap waktu, namun yang dapat direpresentasikan dalam kurva beban. Salah satu metode yang digunakan dalam sistem POPF adalah *Monte Carlo Simulation* (MCS). Metode ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi namun membutuhkan kemampuan komputer yang lebih baik daripada metode OPF, sehingga masih menjadi metode skunder dalam sistem POPF [2].

Dalam Tugas Akhir ini, akan dikembangkan sistem POPF dengan *First Order Second Moment Method* (FOSMM). Ekspansi dari deret Taylor dengan melinierkan suatu sistem yang tidak linier dapat digunakan untuk mengurangi waktu komputasi. Ekspansi deret Taylor tersebut digunakan dalam metode *First Order Second Moment Method* (FOSMM) yang membutuhkan kemampuan komputer paling rendah dibandingkan sistem POPF yang lain dengan mempertimbangkan bagian operasi inisial lebih pada satu penghitungan numerik.

## II. FIRST ORDER SECOND MOMENT PADA OPTIMAL POWER FLOW

### A. Optimal Power Flow

Studi aliran daya merupakan bagian yang sangat penting karena digunakan untuk menganalisa perencanaan, operasi



dan penjadwalan ekonomis. Beberapa metode untuk menghitung aliran daya antara lain *Gauss-Seidel*, *Newton Rhapson*, dan metode *Fast Decouple*. Tujuan studi aliran daya yaitu untuk mengetahui besar tegangan dan sudut fasa pada setiap bus serta aliran daya pada tiap saluran [7,8]. Sistem tenaga memiliki tiga jenis bus, yaitu:

- *Swing* atau *slack bus*  
Nilai tegangan (V) dan sudut tegangan ( $\Theta$ ) adalah 0, dan nilainya tetap. *Swing bus* dijadikan sebagai referensi. Besaran yang dapat dihitung adalah daya aktif dan daya reaktif.
- *Generator bus (PV Bus)*  
Besaran yang diketahui yaitu daya aktif (P) dan nilai tegangan generator (V). Dapat disebut juga dengan *voltage controllled bus* karena nilai tegangan pada bus ini nilainya konstan. Besaran yang dihitung yaitu daya reaktif (Q) dan sudut tegangan ( $\Theta$ ).
- *Load bus (PQ Bus)*  
Besaran yang diketahui yaitu daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). *Load bus* merupakan bus yang tidak terhubung dengan generator. Besaran yang dihitung yaitu nilai tegangan (V) dan sudut tegangan ( $\Theta$ ).

Secara umum, OPF berbasis pada model injeksi bus yang telah dihubungkan dengan sistem transmisi dan model aliran cabang yang telah digunakan untuk sistem distribusi radial [7,8]. Jangkauan yang luas dari OPF telah dikembangkan, termasuk gradien konjugat, *successive quadratic programming*, *branch and node*, relaksasi *Lagrange*, metode titik interior, penguatan simulasi, algoritma genetik dan optimasi partikel *swan* yang direpresentasikan dengan beberapa pertimbangan antara optimisasi, kecepatan konvergen antara keanekaragaman dan penyesuaian untuk masalah spesifik [9,10].

#### B. Probabilistic Optimal Power Flow

OPF dan P-OPF merupakan dua hal sangat penting dalam permodelan sistem tenaga dan operasinya terutama pada pembangkitan energi terbarukan yang saat ini meningkat dan terintegrasi dengan jala-jala [17]. P-OPF sendiri memiliki perbedaan mendasar dengan OPF. P-OPF menggunakan metode pendekatan secara *probabilistic*, yaitu dengan fungsi *Probabilistic Density Function* (PDF) dan *Cumulative Density Function* (CDF) [2]. P-OPF mengatasi masalah faktor-faktor tak tentu dari sistem tenaga sebagai variabel acak dengan distribusi probabilitas pasti dan diperoleh informasi statistik dari solusi optimal, seperti rata-rata, standar deviasi, fungsi PDF dan fungsi CDF [2].

#### C. First Order Second Moment Method

FOSMM menggunakan pendekatan deret Taylor orde pertama yang dikomputasikan ke orde kedua secara statistik. FOSMM bermula dari sistem yang non linier dengan persamaan (1):

$$Z=y(x) \quad (1)$$

Z = output vektor

y = fungsi vektor non linier

x = vector acak dengan mean  $\bar{x}$

Secara umum, fungsi performansi dari sistem FOSMM dapat ditulis sebagai berikut:

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) \begin{cases} > 0, \text{ kondisi aman} \\ = 0 \text{ kondisi limit} \\ < 0 \text{ kondisi salah} \end{cases} \quad (2)$$

Dimana  $g(X)=0$  dikenal sebagai kondisi limit dan setiap n mengindikasikan beban dasar atau variabel resistansi. Biasanya, jumlah dari kondisi limit dapat diidentifikasi untuk sebuah sistem dengan masing-masing representasi sebuah kondisi dari kegagalan sistem, sistem yang tidak bekerja, atau malfungsi pada pengoperasiannya. Untuk mempermudah pengembangan dan analisisnya, semua variabel di transformasi ke bentuk standarisasinya (3).

$$X_i' = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

Nilai ekspektasi dan standar deviasi dari  $X_i'$  adalah nol. Persamaan kondisi limit selanjutnya harus dituliskan dengan bentuk yang sama dengan variabel X, sehingga menjadi seperti berikut (4):

$$g(X_1', X_2', \dots, X_n') \begin{cases} > 0, \text{ kondisi aman} \\ = 0 \text{ kondisi limit} \\ < 0 \text{ kondisi salah} \end{cases} \quad (4)$$

Secara umum,  $g(X')$  merupakan fungsi non linier. Namun, fungsi tersebut dapat dilinierkan pada beberapa point  $X'^0$  menjadi:

$$g(X') = g(x'^0) + \nabla g(x'^0)^T (X' - x'^0) + o(\|X' - x'^0\|) \quad (5)$$

Dimana:

$$\nabla g(x'^0) = \left[ \frac{\partial g}{\partial x_1}(x'^0) \dots \frac{\partial g}{\partial x_n}(x'^0) \right]^T \quad (6)$$

Bentuk order yang lebih tinggi dihilangkan dengan asumsi bahwa  $X$ 's adalah tidak berkorelasi secara statistik, nilai ekspektasi dan standar deviasi dari  $g(X')$  adalah sebagai berikut:

$$\bar{g}_0 = g(x'^0) - \nabla g(x'^0)^T x'^0 \quad (7)$$

$$\sigma_{g_0}^2 = \nabla g(x'^0)^T \nabla g(x'^0) \quad (8)$$

$$\beta_0 = \frac{\bar{g}_0}{\sigma_{g_0}}$$

Jika  $X$ 's berkorelasi, maka bisa digunakan prinsip transformasi komponen sebelum distandarisasi.

Untuk distribusi probabilitas, FOSMM dapat menggunakan orde pertama dan orde kedua yang didapat dari karakteristik probabilitas variabel acak. FOSMM digunakan sebagai nilai untuk karakteristik probabilitas dari beban [1]. Formulasi metode FOSMM menggunakan fungsi Lagrange (9) sebagai berikut:

$$L(\omega) = c(x) - \lambda^T (g(x) - b) - \mu^T h(x) \quad (9)$$

dimana  $\lambda$  dan  $\mu$  = Vektor dari perkalian Lagrange  $\omega = [x^T, \lambda^T, \mu^T]$  Kemudian, fungsi (1) tersebut dioptimalkan menggunakan metode Karush-Kuhn-Tucker (KKT) melalui persamaan (10) berikut ini.

$$\nabla_x L(\omega) = 0 \quad (10)$$

$$g(x) - b = 0$$

$$h(x) \geq 0, \mu \geq 0, \mu_i h_i = 0, (i = 1, \dots, p)$$

Pada paper [2] menyebutkan bahwa, kesuksesan dari metode solusi tergantung pada kemampuan untuk menemukan mengikat ketidakrataannya dengan efisien, dan metode tersebut tidak bisa bekerja dengan baik ketika persamaan iteratifnya dalam keadaan yang rusak. Model P-OPF dapat dengan mudah mengatasi ketidakrataannya. Keuntungan yang lain dari metode ini adalah dapat



menghindari kondisi yang cacat dengan menggunakan matriks koefisien iteratif

### III. PROBABILISTIC-OPTIMAL POWER FLOW (P-OPF) DENGAN METODE FIRST ORDER SECOND MOMENT (FOSM) PADA 5 BUS, 9 BUS DAN 14 BUS IEEE

#### A. Prosedur Komputasional

Penelitian ini menggunakan perhitungan statistik dalam pembagian pembebanan generator, atau sering disebut sebagai *Probabilistic Optimal Power Flow* (POPF). Metode yang digunakan adalah *first order second moment* (FOSMM) dimana pada metode ini mencoba melinierkan sistem yang tidak linier. Pengolahan data dan simulasi dilakukan dengan menggunakan Matlab R2011a, dan dengan menggunakan dile Matpower 5.1 serta pengolahan menggunakan Microsoft Excel. Alur yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



#### B. Penerapan FOSMM pada Case 5 Bus

Data yang digunakan dalam penerapan metode FOSMM ini adalah dari dari matpower IEEE. Data bus dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1 Data IEEE 5 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	2	0	230
2	1	L1	230
3	2	L2	230
4	3	L3	230
5	1	0	230

Tipe bus tipe 1 adalah Pq bus, sedangkan bus tipe 2 adalah Pv bus yang biasanya terhubung langsung dengan generator. Sementara itu, bus tipe 3 adalah *slack* bus yang digunakan untuk referensi dan cadangan pembangkit. Pada sistem IEEE 5 bus ini base tegangan yang digunakan adalah 230 kV.

Tabel 2 Data pembangkit 5 bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)
1	$14P_1$	240	10
3	$40P_3$	100	10
4	$40P_4$	350	10

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa *cost function* yang digunakan pada sistem IEEE 5 bus ini adalah polinomial dengan  $P_i$  adalah jumlah daya yang dibangkitkan masing-masing generator  $i$ . Daya maksimal yang mampu dibangkitkan sistem ini adalah 690 MW dengan nilai *slack bus* mencapai 350 MW. Nilai *slack bus* yang besar ini digunakan sebagai cadangan daya ketika terjadi beban penuh pada saluran.

Tabel 3 Data saluran IEEE 5 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	2	0.0281	400
2	1	4	0.0304	400
3	1	5	0.0064	400
4	2	3	0.0108	400
5	3	4	0.0297	400
6	4	5	0.0297	240

Dari Tabel 3 diperoleh informasi bahwa nilai  $x$  merupakan nilai reaktansi saluran. Dimana nilai ini bergantung terhadap jenis kabel transmisi dan juga panjang saluran. Saluran tersebut juga memiliki kapasitas saluran yang digunakan untuk membatasi aliran daya sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.

#### C. Penerapan FOSMM pada Case 9 Bus

Penerapan FOSMM pada IEEE 9 bus juga sama seperti penerapan terhadap sistem 5 bus. Data dari sistem IEEE 9 bus dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5 Data IEEE 9 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	3	0	345
2	2	0	345
3	2	0	345
4	1	0	345
5	1	L1	345
6	1	0	345
7	1	L2	345
8	1	0	345
9	1	L3	345

Pada sistem IEEE 9 bus, tegangan base yang digunakan adalah 345 kV berbeda dengan sistem IEEE 5 bus yang memiliki tegangan base 230 kV. Selain itu, *cost function* dari *case 9* bus juga sedikit berbeda dengan *case 5* bus meskipun sama-sama polinomial.

Tabel 6 Data pembangkit 9 bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	250	10
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	300	10
3	$0.1225P_3^2 + P_3 + 335$	270	10



Tabel 7 Data saluran dan kapasitas saluran IEEE 9 Bus

Saluran	From Bus	To Bus	x	Kapasitas Saluran (MW)
1	1	4	0.0576	250
2	4	5	0.092	250
3	5	6	0.17	150
4	3	6	0.0586	300
5	6	7	0.1008	150
6	7	8	0.072	250
7	8	2	0.0625	250
8	8	9	0.161	250
9	9	4	0.085	250

#### D. Penerapan FOSMM pada Case 14 Bus

Penerapan data terakhir dalam penelitian tugas akhir ini adalah sistem IEEE 14 bus dengan modifikasi di bagian beban. Pada sistem IEEE 14 bus awalnya memiliki lima beban, namun pada penelitian ini digunakan profil tiga beban seperti pada sistem IEEE 5 bus dan IEEE 9 bus sebelumnya. Data bus dari sistem IEEE 14 bus dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8 Data IEEE 14 Bus

Bus	Tipe	Pd (MW)	Tegangan (kV)
1	3	0	300
2	2	0	300
3	2	0	300
4	1	0	300
5	1	0	300
6	2	0	300
7	1	0	300
8	2	0	300
9	1	L1	300
10	1	L2	300
11	1	L3	300
12	1	0	300
13	1	0	300
14	1	0	300

Sistem IEEE 14 ini memiliki lima unit pembangkit yang memiliki kapasitas daya yang berbeda beda. Setiap pembangkit juga memiliki *cost function* yang berbeda. Data pembangkit dari sistem IEEE 14 bus ini dapat dilihat pada Tabel 9 berikut ini.

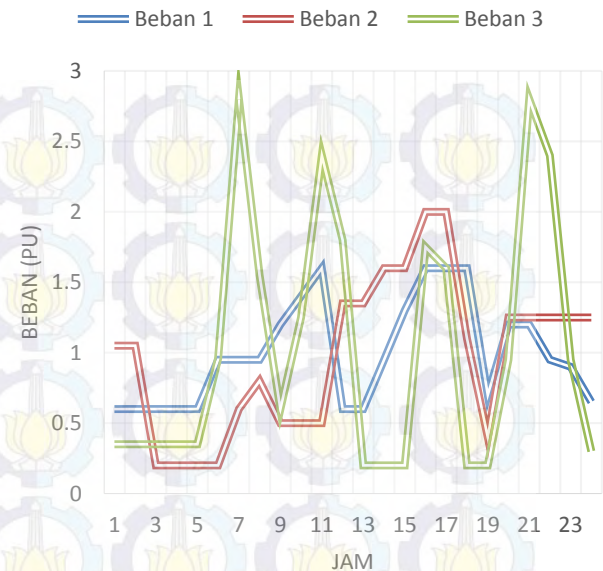
Tabel 9 Data Pembangkit 14 Bus

Unit	Cost Function	P max (MW)	P min (MW)
1	$0.043P_1^2 + 20P_1$	332	10
2	$0.025P_2^2 + 20P_2$	140	10
3	$0.01P_3^2 + 40P_3$	100	10
4	$0.01P_4^2 + 40P_4$	100	10
5	$0.01P_5^2 + 40P_5$	100	10

#### IV. SIMULASI PROGRAM POPF BERBASIS PERSAMAAN STATISTIK FIRST ORDER SECOND MOMENT METHOD

##### A. Profil Beban

Program simulasi *Optimal Power Flow* dengan pendekatan probabilistik berbasis sebelumnya di simulasikan terlebih dahulu dengan M-file OPF yang telah dibuat. Setelah itu, hasil running M-file dari OPF kemudian diolah lebih lanjut secara statistik. Profil beban yang digunakan dalam penerapan di sistem 5, 9 dan 14 bus adalah sebagai berikut.



Gambar 1 Profil Beban

##### B. Nilai Rata-rata dan Simpangan Baku

Hasil simulasi *FOSMM* berisi tegangan dan sudut tegangan bus, serta daya yang dibangkitkan kemudian dianalisis secara statistik untuk menemukan nilai rata-rata dan penyimpangan baku. Melalui persamaan (7) dan (8), didapatkan parameter statistik seperti pada Tabel 9, 10 dan 11.

Tabel 9 Parameter Statistik pada Sistem 5 Bus

i	$\mu V_{mi}$	$\sigma V_{mi}$	$\mu V_{ai}$	$\sigma V_{ai}$
1	1.099122	0.037898	0.7081	0.003724
2	1.089286	0.077642	-0.9055	0.006599
3	1.096123	0.078214	-1.0615	0.006690
4	1.097950	0.093165	0.0000	0.000000
5	1.099039	0.048399	0.5828	0.004404

i	$\mu P_{gi}$	$\sigma P_{gi}$	$\mu Q_{gi}$	$\sigma Q_{gi}$
1	0.866778	0.404277	0.253483	0.043102
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	1.367219	0.404392	1.727408	0.000000
4	0.970481	0.403236	1.318733	0.000204
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Tabel 10 Parameter Statistik pada Sistem 9 Bus

i	$\mu V_{mi}$	$\sigma V_{mi}$	$\mu V_{ai}$	$\sigma V_{ai}$
1	1.099847	0.008288	0.0000	0.000000
2	1.099127	0.012953	-23.4580	0.133064
3	1.095492	0.009253	-25.8591	0.049061
4	1.057404	0.033954	-31.4860	0.039472
5	1.068738	0.024471	-34.1328	0.056877
6	1.094036	0.026654	-29.0148	0.026476
7	1.085191	0.021451	-31.0676	0.036359
8	1.089947	0.030553	-28.2341	0.023812
9	1.098980	0.019620	-33.6964	0.053544

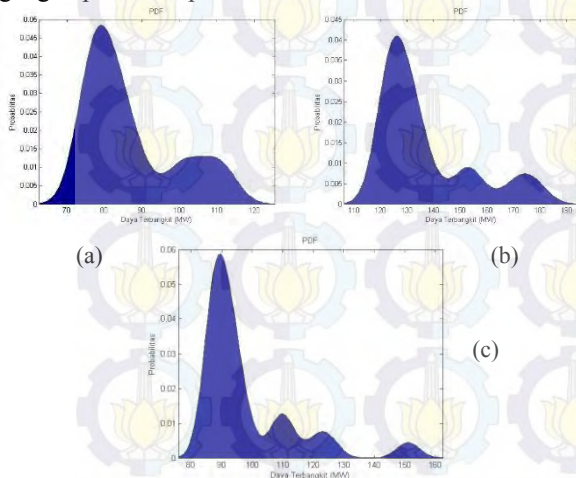
i	$\mu P_{gi}$	$\sigma P_{gi}$	$\mu Q_{gi}$	$\sigma Q_{gi}$
1	0.868668	0.525532	1.073455	0.442663
2	1.366587	0.500565	0.478701	0.361568
3	0.981523	0.440442	0.958784	0.419904
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000



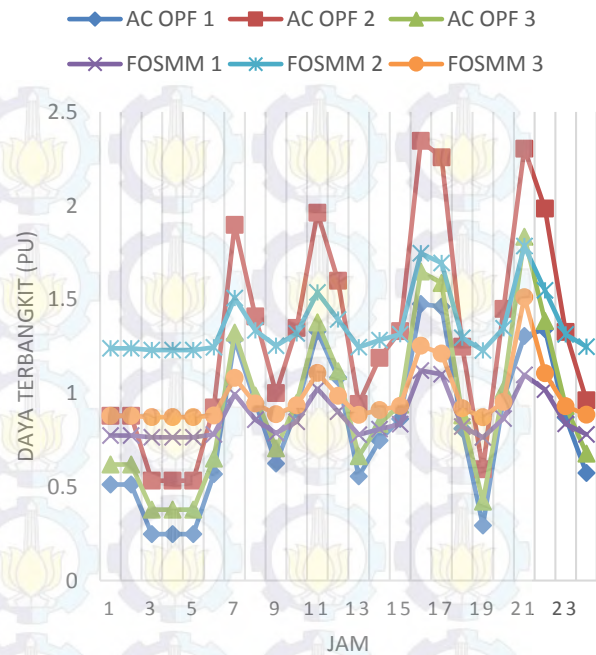
Tabel 11 Parameter Statistik pada Sistem 14 Bus

i	$\mu$ Vmi	$\sigma$ Vmi	$\mu$ Vai	$\sigma$ Vai
1	1.013703	0.049749	0.0000	0.129719
2	1.000392	0.063355	-2.8484	0.196366
3	0.996324	0.020093	-5.5709	0.062725
4	0.969837	0.065849	-7.6476	0.235357
5	0.973437	0.060154	-6.8689	0.218017
6	1.039712	0.044165	-15.2314	0.120283
7	1.000900	0.000000	-15.0929	0.126507
8	1.033006	0.001031	-14.0660	0.038195
9	0.988802	0.029394	-19.7029	0.038195
10	0.966709	0.031967	-22.1014	0.153235
11	0.981101	0.022071	-20.4688	0.089501
12	1.036707	0.026871	-15.5614	0.052936
13	1.031279	0.048079	-15.8272	0.073331
14	1.006544	0.027390	-17.9604	0.034968
i	$\mu$ Pgi	$\sigma$ Pgi	$\mu$ Qgi	$\sigma$ Qgi
1	1.862895	0.384025	0.000154	0.007678
2	0.462206	0.390874	0.034560	0.008334
3	0.417336	0.386249	0.084242	0.006685
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.383586	0.387356	0.129017	0.007730
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.312729	0.385115	0.239946	0.006900
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Hasil simulasi *FOSMM* dari masing-masing sistem telah memenuhi kriteria saluran. Seperti pada tegangan dimana  $V_{max}$  pada Bus 1 sistem 5 Bus adalah 1.1 pu dan  $V_{min}$  sebesar 0.9 pu, sedangkan hasil simulasi adalah 1.1 pu maksimal dan 1.05 pu minimal. Mean menunjukkan nilai rata-rata dari sistem tersebut selama 24 jam, sementara penyimpangan baku adalah sebaran data dari nilai rata-rata ketika sistem tersebut berjalan. Pada *slack bus* di ketiga sistem tidak memiliki rata-rata dan variasi pada sudut tegangan, hal ini dikarenakan *slack bus* merupakan referensi tegangan pada setiap bus saluran.



Gambar 2 Persebaran Data Daya Terbangkit Masing Masing Bus pada Sistem IEEE 9 Bus, (a) Pg1, (b) Pg2 dan (c) Pg3

Gambar 3 Perbandingan AC OPF dan *FOSMM* pada Sistem 9 Bus

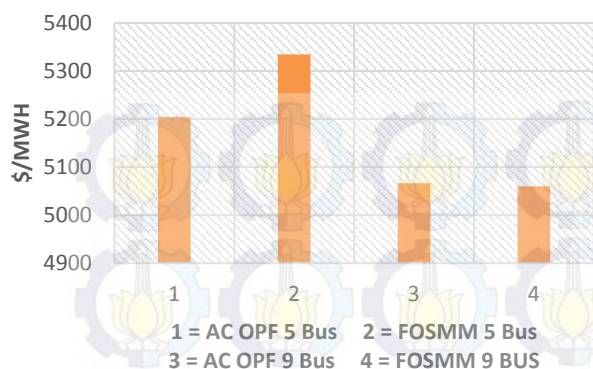
### C. Perbandingan Biaya dengan AC OPF

Biaya pembangkitan dari simulasi AC OPF dapat diketahui melalui running program matpower dengan mempertimbangkan *cost function* nya. Sedangkan untuk biaya pembangkitan dari *FOSMM* di dekati dengan turunan pertamanya. Hasil dari kedua metode ini dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12 Perbandingan Biaya Pembangkitan

Jam	IEEE 5 Bus		IEEE 9 Bus	
	AC OPF	<i>FOSMM</i>	AC OPF	<i>FOSMM</i>
1	2807.75	2171.635283	2923.06	2542.325235
2	2807.75	2171.635283	2923.04	2542.325235
3	1612.8	388.6086675	1794.89	502.5031354
4	1612.8	388.6086675	1794.89	502.5031354
5	1612.8	388.6086675	1794.89	502.5031354
6	2960.6	2499.202523	3140.98	2856.020255
7	11185.17	9223.916933	9110.82	8524.581595
8	6987.13	6075.416933	5708.3	5751.248645
9	3228.85	3073.945043	3474.49	3306.806785
10	6388.63	5626.616933	5358.16	5414.444945
11	11791.44	9678.716933	9662.73	8914.009185
12	8790.81	7428.116933	6923.48	6831.366275
13	3019.77	2626.089833	3176.92	2906.299565
14	4800.18	4435.016933	4355.07	4366.698665
15	6207.25	5490.416933	5171.61	5230.132335
16	15227.09	12255.41693	12672.99	10832.76733
17	14627.09	11805.41693	12015.66	10441.73003
18	5402.19	4886.516933	4725.26	4770.207405
19	1823.72	863.4461225	1957.34	861.7657154
20	7397.41	6383.216933	5936.4	5964.090445
21	14797.39	11932.91693	12701.28	10765.21257
22	12193.44	9980.216933	9809.19	9014.971185
23	6192.77	5479.616933	5161.58	5220.010335
24	3089.63	2775.774863	3264.18	3026.436865
$\mu$	5204.06	5334.54	5066.29	5060.13





Gambar 4 Perbandingan Biaya Pembangkitan

Dari data di atas dapat dilihat bahwa pada sistem 5 bus, biaya pembangkitan FOSMM lebih mahal daripada AC OPF. Namun, pada sistem 9 Bus justru FOSMM memiliki biaya pembangkitan daripada AC OPF. Hal ini disebabkan karena pada perbedaan Jacobian matriks yang sangat besar setiap jamnya pada sistem 5 bus. Selain itu, metode FOSMM bisa digunakan untuk memprediksi atau *forecasting* pembangkitan daya per jamnya sedangkan AC OPF tidak bisa digunakan.

## V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisis, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. *First Order Second Moment Method* (FOSMM) dapat digunakan sebagai *forecasting* pembagian pembebanan pembangkit dengan mempertimbangkan kapasitas saluran. Hasil *forecast* dari FOSMM memiliki deviasi sebesar 10% pada sistem IEEE 5 bus, 8% pada sistem IEEE 9 bus dan 5% pada sistem modifikasi IEEE 14 bus.
2. Output dari POPF adalah nilai rata-rata dan penyimpangan baku masing-masing variabel, dimana rata-rata merupakan nilai rata-rata keseluruhan sistem dan penyimpangan baku merupakan besarnya sebaran data. Dimana pada sistem 5 bus, tegangan pada masing masing bus memiliki nilai antara 1.7 -1.1 pu, sedangkan pada sistem 9 bus dan 14 bus memiliki tegangan antara 1.02 - 1.1 pu yang memenuhi batas toleransi tegangan pada bus yaitu 0.9 – 1.1 pu.
3. Hasil perhitungan FOSMM memiliki persebaran data yang kecil dengan deviasi sebesar 5% namun memiliki rata-rata yang serupa dengan model AC OPF.
4. Pada sistem 9 dan 14 bus, hasil FOSMM memiliki biaya pembangkitan yang lebih murah 0.5% atau 50 USD, sedangkan sistem 5 bus lebih mahal 2% atau 200 USD daripada menggunakan AC OPF. Namun, metode AC OPF tidak bisa digunakan sebagai *forecasting* pembangkit.

## VI. SARAN

Adapun saran sebagai pertimbangan penelitian selanjutnya pada bidang operasi sistem tenaga berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membandingkan dengan metode POPF yang sudah ada seperti MCS atau metode estimasi titik.

2. Mempertimbangkan *ramp rate* generator.
3. Mengembangkan POPF menjadi *unit commitment* sehingga semakin mendekati keadaan *real* sistem.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. G. Muljo Adji, "Gambaran Umum Pengelolaan Sistem Jawa Bali", Ekspose Sekuriti Sistem Jawa Bali, Jakarta, 2005.
- [2] Li, Xue, Yuzeng Li, dan Shaohua Zhang. 2008. "Analysis of Probabilistic Optimal Power Flow Taking Account of the Variation of Load Power". IEEE Trans. Power Syst., Vol 21, No. 3 992-999.
- [3] Zou, Bin and Qing Xiao. 2013. "Solving Probabilistic Optimal Power Flow Problem Using Quasi Monte Carlo Method and Ninth-Order Polynomial Normal Transformation". IEEE Trans. Power Syst.
- [4] M. E. El-Hawary dan G. A. N. Mbamalu. 1991. "A Comparison of Probabilistic Perturbation and Deterministic Based Optimal Power Flow Solutions". IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 3, pp. 1099-1105.
- [5] M. Madrigal, K. Ponnambalam, dan V. H. Quintana. 1998. "Probabilistic Optimal Power Flow". Proc. IEEE Can. Conf. Electrical and Computer Engineering, Waterloo, ON, Canada, pp. 385-388.
- [6] A. Schellenberg, W. Rosehart, dan J. Aguado. 2004. "Cumulant Based Probabilistic Optimal Power Flow (P-OPF)". Proc. Int. Conf. Probabilistic Methods Applied Power Systems, pp. 506-511.
- [7] A. Schellenberg, W. Rosehart, dan J. Aguado. 2005. "Cumulant-Based Probabilistic Optimal Power Flow (P-OPF) With Gaussian And Gamma Distributions". IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 2, pp. 773-781, May 2005.
- [8] Saadat, Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [9] Ameli, Mohammad Taghi, Moslehpour, Saeid, Golnadsadat, MahdaviKhah, "Determining the Spinning Reserve In Power Systems By Corrected Recursive PJM Method", Proc. of the 2008 IAJC-IJME International Conference, 2008.
- [10] Billinton, R., Allan, R.N, "Reliability Evaluation of Power Systems", Pitman Publisher, Boston, 1984.
- [11] Gooi, B., Mendes, D.P, Bell, K.R.W, dkk, "Optimal Scheduling of Spinning Reserve", IEEE Trans. Power Systems, vol.14 no.4, November 1999.
- [12] Su, Ching-Tzong, Lin, Chi-Min, Wang, Yung-Fu, "Economic Dispatch and Spinning Reserve Scheduling for Generation Transmission Systems", IEEE MELECON 2004, Dubrovnik, Kroasia, Mei 2004.
- [13] Chapman, Stephen J., "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill, 2005.
- [15] Marsudi, Djiteng, "Operasi Sistem Tenaga Listrik", Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006.
- [16] Marsudi, Djiteng, "Pembangkitan Energi Listrik", Erlangga, Jakarta, 2006.
- [17] Xiao, Qing. 2015. "Comparing Three Methods for Solving Probabilistic Optimal Power Flow". Electric Power System Research 124 (2015) 92-99.